



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DO AMAZONAS  
CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL**

**MÁRIO JORGE ARAGÃO DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR MOSFET**

**MANAUS – AM  
2023**

**MÁRIO JORGE ARAGÃO DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR MOSFET**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, como requisito para obtenção do diploma do curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial.

**Orientador:** Prof. Esp. Celso Souza  
Cordeiro

**MANAUS – AM  
2023**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586c Silva, Mário Jorge Aragão da.  
Caracterização elétrica do transistor Mosfet / Mário Jorge Aragão da Silva. — Manaus, 2023.  
40f.: il. (color.).

Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial, 2023.  
Orientador: Prof.º Celso Souza Cordeiro, Esp.

1. Caracterização elétrica. 2. Transistor Mosfet. 3. Mosfet. I. Cordeiro, Celso Souza. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.

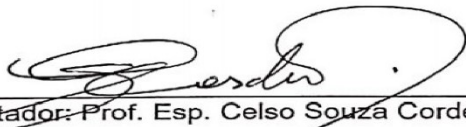
CDD 621.381


## CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR MOSFET

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial do Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas como requisito parcial para obtenção do Título Tecnólogo em Eletrônica Industrial.

Aprovado em 23 de fevereiro de 2023.

### BANCA EXAMINADORA

  
Orientador: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro

  
1º Examinador: Prof. Me. Jose Geraldo de Pontes e Souza

  
2º Examinador: Prof. Esp. Evertton Andrey Godinho Ribeiro

Aos meus pais Mário Jeffres da Silva e Raimunda Santana de Aragão (in memoriam), foram meus grandes incentivadores desde o início. A minha esposa meus filhos e meus irmãos pelo carinho e paciência.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida, por me ajudar e me proteger durante esta jornada ao conhecimento.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) pela oportunidade e por tudo que aprendi ao longo do curso.

Ao meu orientador Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro, por ter aceitado me orientar e me ajudado nas minhas limitações de conhecimento.

A todos os professores da instituição, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

A todos os alunos de minha turma, pelo companheirismo ao longo deste percurso.

A minha querida esposa, Maria Raimunda da Costa Silva pela pelo carinho e apoio.

Aos meus filhos e irmãos pelo incentivo constante.

A ciência de hoje é a tecnologia de amanhã.

(Edward Teller)

**RESUMO:**

O conhecimento dos transistores é de suma importância para o estudante de eletrônica. Objetiva-se neste trabalho fazer a caracterização elétrica do transistor Mosfet. Trata-se de uma pesquisa bibliográfica e do uso dos instrumentos de medição dos laboratórios do IFAM-CMDI, serão coletadas informações de seu funcionamento como tensão, corrente e curva característica, para isso será montado um circuito simples em um protoboard. Após coletadas as medições de tensão e corrente do transistor Mosfet, esses dados serão inseridos no simulador MultiSim. Os resultados das medições elétricas no protoboard e no simulador MultiSim serão comparadas com o datasheet do transistor Mosfet 2N7000. Foi possível concluir que os resultados obtidos das medições elétricas de tensão, corrente e curva característica do transistor 2N7000 se aproximam dos valores no datasheet do referido transistor.

**Palavras-chave:** Caracterização elétrica. Transistor Mosfet. Mosfet.



## **ABSTRACT:**

Knowledge of transistors is of paramount importance for the student of electronics. The objective of this work is to make the electrical characterization of the Mosfet transistor. This is bibliographical research and the use of measuring instruments from the IFAM-CMDI laboratories, information on their operation will be collected such as voltage, current and characteristic curve, for which a simple circuit will be mounted on a protoboard. After collecting the voltage and current measurements of the Mosfet transistor, these data will be inserted into the MultiSim simulator. The results of the electrical measurements on the breadboard and the MultiSim simulator will be compared with the Mosfet 2N7000 transistor datasheet. It was possible to conclude that the results obtained from electrical measurements of voltage, current and characteristic curve of the 2N7000 transistor are close to the values in the datasheet of said transistor.

Keywords: Electrical characterization. Mosfet transistor. Mosfet.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Região de Depleção .....   | 18 |
| Figura 2 - Estrutura Simplificada da Válvula Tríodo .....   | 20 |
| Figura 3 - Circuito Válvula do Tríodo.....  | 21 |
| Figura 4 - Estrutura simples do transistor FET.....   | 21 |
| Figura 5 - FET com configuração fonte comum .....   | 22 |
| Figura 6 - Estrutura do NMOS secção transversal .....   | 23 |
| Figura 7 - NMOS tipo enriquecimento com tensão positiva aplicada à ponta um canal é induzido no substrato abaixo da porta .....   | 24 |
| Figura 8 - NMOS com $V_{GS} > V_t$ e pequeno valor de $V_{DS}$ aplicado. O dispositivo age como uma condutância controlada por $V_{GS}$ . A condutância do canal é proporcional a $V_{GS} - V_t$ . $I_D$ é proporcional a $(V_{GS} - V_t) V_{DS}$ ..... | 25 |
| Figura 9 - Característica $I_D - V_{DS}$ no MOSFET .....  | 26 |
| Figura 10 - MOSFET canal N com canal em pinch – off ou saturação .....  | 27 |
| Figura 11 - Corrente de dreno $I_D$ versus a tensão dreno fonte, para $V_{GS} > V_t$ .....  | 28 |
| Figura 12 - MOSFET tipo enriquecido.....  | 29 |
| Figura 13 - Placa do laboratório Indústria III. IFAM – CMDI .....   | 31 |
| Figura 14 - Fonte Keithley 2231A-30-3 .....   | 31 |
| Figura 15 - Multímetro Keysight 34460 <sup>a</sup> .....  | 32 |
| Figura 16 - Transistor MOSFET com encapsulamento TO-92 .....  | 33 |
| Figura 17 - Circuito com transistor MOSFET 2N7000 .....   | 34 |
| Figura 18 - Circuito montado no protoboard.....   | 34 |
| Figura 19 - Circuito com MOSFET 2N7000.....   | 37 |
| Figura 20 - Curva característica $I_D - V_{GS}$ . tensão de limiar .....  | 37 |
| Figura 21 - Curvas características do Funcionamento do MOSFET canal N .....   | 38 |
| Figura 22 - Curvas do transistor MOSFET no Datasheet.....   | 39 |
| Figura 23 – Datasheet do MOSFET 2N700 .....   | 39 |

## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores medidos de VGS, VDS, ID ..... | 35 |
|--|----|

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

FET - Field Effect Transistor

P – Positivo

N – Negativo

S – Source

G – Gate

VDD – Tensão aplicada entre dreno e a fonte

VGG – Tensão aplicada entre gate (porta) e a fonte

VGS – Tensão medida entre gate (porta) e a fonte

D – Drain ou Coletor

S – Source ou emissor

IFAM – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas

CMDI – Campus IFAM Distrito Industrial

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO.....   | 15 |
| Justificativa.....  | 15 |
| Objetivo Geral .....  | 15 |
| Objetivo Específico .....                                       | 15 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                                   | 16 |
| 2.1 Semicondutores .....  | 16 |
| 2.2 Semicondutores do tipo P e do tipo N .....                  | 16 |
| 2.3 Região de depleção.....                                     | 18 |
| 2.4 O Transistor .....  | 19 |
| 2.5 O transistor FET .....                                      | 20 |
| 2.6 O transistor MOSFET canal N .....                           | 22 |
| 2.7 Princípios operacionais do MOSFET canal N.....              | 23 |
| 2.8 MOSFET funcionando na condição de inversão.....             | 24 |
| 2.9 NMOS funcionando na região ôhmica .....                     | 25 |
| 2.10 NMOS operando com aumento de $V_{DS}$ .....                | 26 |
| 2.11 Regiões de operação no MOSFET .....                        | 27 |
| 2.12 Equações, símbolos e parâmetros do MOSFET canal N.....     | 28 |
| 3 METODOLOGIA.....  | 30 |
| 3.1 Local de Estudo .....                                       | 30 |
| 3.2 Análises .....  | 30 |
| 3.3 Instrumentos utilizados na coleta de dados .....            | 31 |
| 3.3.1 Fonte de Alimentação Keithley 2231-30-3 .....             | 31 |
| 3.3.2 Multímetro digital Keysight 34460A .....                  | 32 |
| 3.4 Componente Transistor 2N7000 - MOSFET de Canal N TO-92..... | 33 |
| 3.5 Circuito com o transistor MOSFET 2N7000 .....               | 34 |
| 4 RESULTADOS E COMENTARIOS .....                                | 35 |
| 4.1 Resultado experinmento prático em laboratório.....          | 35 |
| 4.2 Resultado do Circuito Simulado no MultiSim .....            | 36 |
| 4.3 Datasheet fornecido pelo fabricante .....                   | 38 |
| 5 CONCLUSÃO.....  | 40 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                | 41 |

## **1 INTRODUÇÃO**

Esse trabalho aborda o tema caracterização elétrica do transistor Mosfet e trata-se de uma pesquisa bibliográfica e do uso de instrumentos de medição que serão usados para coleta de dados e posterior comparação com o datasheet do transistor 2N7000.

A importância de estudar esse tema é que ele tem grande relevância em nossa atualidade, principalmente para os estudantes de eletrônica e os que trabalham com ela. O transistor Mosfet é usado praticamente em todas as placas de circuitos eletrônicos seja como chave ou como amplificador, seu uso requer um certo grau de conhecimento de como ser utilizado sem erros em um projeto de circuito elétrico.

No entanto, um problema relacionado a esse tema é que fazer a caracterização do transistor Mosfet de maneira eficiente requer instrumentos de medição adequados e que estejam devidamente calibrados por empresas de certificação, e esses instrumentos custam caros para se adquirir. Essa dificuldade pode ser amenizada usando os laboratórios da instituição.

### **Justificativa**

Essa pesquisa é bem relevante na minha área de atuação, pode servir como apoio de pesquisa para alunos da instituição e para técnicos que fazem a manutenção em aparelhos eletrônicos pois estão sempre fazendo uso desse componente.

### **Objetivo Geral**

O objetivo deste estudo é realizar uma revisão de literatura sobre o tema caracterização elétrica do transistor Mosfet complementando o estudo com práticas de laboratório.

### **Objetivo Específico**

Encontrar materiais literários publicados nos últimos 5 anos sobre o assunto. Realizar teste elétrico e teste virtual no transistor Mosfet nos laboratórios do IFAM-CMDI.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse trabalho tem como finalidade mostrar a caracterização elétrica do transistor Mosfet, um importante componente e de grande utilização na indústria eletrônica. Serão descritos os princípios de funcionamento e a análise de tensão e corrente necessárias para sua caracterização bem como a utilização do simulador MultiSim para fazer o levantamento da curva característica.

### 2.1 Semicondutores

Os materiais semicondutores são bastante importantes eles são as bases dos equipamentos e dos dispositivos que é usado em equipamentos eletrônicos. Nesses casos os materiais semicondutores mais usados são o silício e o germânio sendo que o silício é muito mais utilizado. A estrutura atômica do átomo de germânio possui 32 elétrons, Ge ( $Z=32$ ) distribuídos nas camadas eletrônicas chamadas de subníveis que são,  $1s^2$ ,  $2s^2$ ,  $2p^6$ ,  $3s^2$ ,  $3p^6$ ,  $4s^2$ ,  $3d^{10}$ ,  $4p^2$ . O diagrama está em ordem crescente de energia e a medida que se desloca para a direita o nível de energia vai aumentando portanto, o último subnível é que possui o maior nível de energia que seria o  $4p^2$ . O germânio e o silício possuem 4 elétrons em sua última camada de valência e são chamados de átomos tetravalentes.

Os átomos de germânio e silício estabelecem ligações covalentes possuem elevadas eletropositividades que é a capacidade que um átomo tem de doar elétrons a outro quando estão envolvidos em uma ligação química uma característica dos condutores. Os isolantes tem elevadas eletronegatividades que é a capacidade de um átomo atrair elétrons para si mesmo em uma ligação química.

“os semicondutores: materiais que não são nem condutores nem isolados. Os semicondutores contêm alguns elétrons livres, mas o que os torna diferentes é principalmente a presença de lacunas” (MALVINO, BATES, 2016).

### 2.2 Semicondutores do tipo P e do tipo N

De acordo com Boylestad (2013) todos os componentes usados na eletrônica tiveram que passar por um processo de purificação e de dopagem antes da sua construção.

Um material semiconductor que tenha sido submetido ao processo de dopagem é chamado de material extrínseco. Há dois materiais extrínsecos de enorme importância para a fabricação de um dispositivo semiconductor: materiais do tipo n e do tipo p. Cada um deles é descrito detalhadamente nas subseções seguintes. Material do tipo n. Tanto os materiais do tipo n quanto os do tipo p são formados pela adição de um número predeterminado de átomos de impureza a uma base de silício. Um material do tipo n é criado pela introdução de elementos de impureza que têm cinco elétrons de valência (pentavalentes), tais como antimônio, arsênio e fósforo. Cada um deles faz parte de um subgrupo de elementos na Tabela Periódica dos Elementos chamado de Grupo V, porque cada um tem cinco elétrons de valência. (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2013, p. 7)

É importante saber quais são os processos por que passam os elementos silício e germânio antes de se transformarem em componentes eletrônicos. O silício é encontrado em abundância na natureza na forma de areia, barro, rocha e solo, por aí percebemos que ele vem misturado com outros elementos. Para obter um silício ultrapuro é necessário que o elemento passe por um processo em altas temperaturas para se separar dos outros elementos.

Depois de passado pelo processo de purificação, esse elemento é chamado de semiconductor intrínseco ou um cristal puro que não recebeu nenhum tipo de dopagem de outro material é também um péssimo condutor.

O silício e o germânio são chamados de tetravalentes por possuírem quatro elétrons na camada de valência fazem ligações covalentes com outros quatro elétrons. Se no cristal de silício for adicionado átomos com 5 elétrons na camada de valência, esse elemento se torna estranho, uma impureza, um dopante. O silício dopado faz ligação covalente com o material pentavalente e um elétron não participará da ligação se tornando elétron livre.

Esse elétron livre vai se movimentar na rede cristalina, o material se tornará bom condutor de energia e se chamará semiconductor do tipo n. O mesmo processo será feito para o material tipo p.



## 2.3 Região de depleção

Para entender melhor a região de depleção temos que falar do átomo, um átomo é considerado neutro quando o número de prótons é igual ao número de elétrons, e para atingir a estabilidade química o átomo tem que compartilhar elétrons até alcançar oito elétrons em sua última camada alcançando a estabilidade química.

Analisando a junção de semicondutores de tipos diferentes e sem nenhuma diferença de potencial sendo aplicada, verifica-se que quando os elétrons do lado N passam para o lado P, perdem elétrons alcançando a estabilidade se tornando íons positivos e agora o átomo tem mais prótons no núcleo do que elétrons na eletrosfera.

Da mesma maneira acontecem com o semicondutor da região do P, os átomos irão receber os elétrons vindos da região N, vão se estabilizar quimicamente e vão se tornar íons negativos, o elétron na eletrosfera será em número maior que os prótons no núcleo.

A região de depleção é formada em torno de uma junção P-N de um semicondutor. No semicondutor do tipo P temos um acúmulo de íons negativos, e do lado de semicondutor do tipo N temos acúmulo de íons positivos. Quanto mais elétrons passam por essa barreira de potencial mais íons são formados. Os íons acabam que dificultando o ato de passar por essa barreira. Os elétrons tem carga elétrica negativa tentam chegar até uma lacuna no lado P, mas são impedidos pelos íons negativos que se formaram na junção do tipo P, vindos do semicondutor do tipo N. Como cargas elétricas iguais se repelem, surge então uma força de repulsão entre os elétrons livres do canal N e de íons negativos do lado P. A figura 1 representa a barreira de potencial formada pelos íons negativos e positivos na região de junção. (BOYLESTAD, NASHELSKY, 2013)

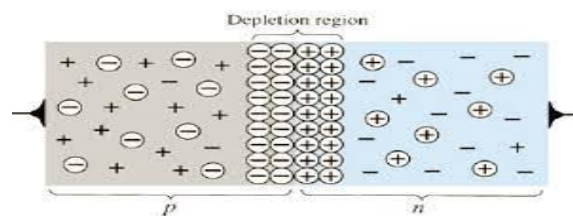


Figura 1 - Região de Depleção

Fonte: Boylestad e Nashelsky, (2013)

## 2.4 O Transistor

De acordo com o autor RAS (2020) a descoberta do transistor trouxe grande avanço para a indústria de tecnologia. Uma das vantagens dessa descoberta, foi com relação ao tamanho do componente pois ocupava muito espaço onde era utilizado.

Dentro do contexto que envolve os primeiros computadores do mundo, eram produzidas grandes máquinas que ocupavam espaços colossais e consumiam gigantescas quantidades de energia. Elas eram construídas a partir de válvulas termiônicas, que eram peças de custo elevado e que superaqueciam e se danificavam com muita facilidade. Então, por volta de 1947, foram criados os transistores de silício e germânio (materiais semicondutores) por autoria dos físicos estadunidenses John Bardeen, Walter House Brittain e William Shockley. Esses componentes novos apresentavam um custo relativamente menor e uma eficiência consideravelmente maior, ocasionando, por fim, na substituição das problemáticas válvulas termiônicas nos computadores futuramente desenvolvidos.

Em questão de funcionamento, os transistores apresentam basicamente dois modos. Eles podem operar como amplificadores, ampliando um sinal muito pequeno, como o sinal de áudio de um microfone, por exemplo, ou como chaves, que é a parte mais interessante disso tudo. No contexto de chaves, a saída do componente transita entre valores de desativado (baixa tensão) e de ativado (alta tensão), correspondentes aos binários 0 e 1. Dessa maneira, por meio do que conhecemos atualmente como linguagem de máquina, foi possível manipular códigos binários e controlar essas máquinas, o que ofereceu as condições favoráveis ao mundo contemporâneo de evoluir. (RAS, 2020)

Os transistores substituíram as antigas válvulas tornando o produto com menor consumo de energia elétrica e com melhor desempenho funcional. Basicamente é constituído de três

camadas de semicondutores formando a seguinte sequência: p-n-p ou n-p-n, funcionando como dois diodos colocados em oposição unidos pela camada semicondutora central.

As três camadas que formam um transistor são chamadas de semicondutor, são elas base, emissor, coletor. Ao se fazer passar uma corrente elétrica pela base, o transistor o se torna condutor diminuindo a resistência entre coletor e emissor.

## 2.5 O transistor FET

O nome transistor de efeito de campo é derivado do princípio de seu funcionamento. O mecanismo de controle da corrente é baseado num campo elétrico onde uma tensão é aplicada no terminal de controle.

FET “Field Effect Transistor”, ou transistor de efeito de campo são dispositivos que tem características muito melhores de funcionamento que os transistores comuns, suas diferenças estão no modo de funcionamento. Os transistores são dispositivos semicondutores que podem ser usados como chaves e como amplificadores em circuitos eletrônicos. A diferença entre um transistor BJT e FET é que no transistor bipolar a corrente envolve portadores majoritários e minoritários, no semicondutor tipo N os portadores majoritários são os elétrons e no semicondutor do tipo P são as lacunas. Em contraste o FET é um tipo de transistor unipolar onde apenas os portadores majoritários fluem.

É importante saber que as antigas válvulas tríodos tinham um funcionamento bem parecido com os transistores de efeito de campo que é amplificar tensão. Na figura 2 temos a estrutura simplificada da válvula tríodo.

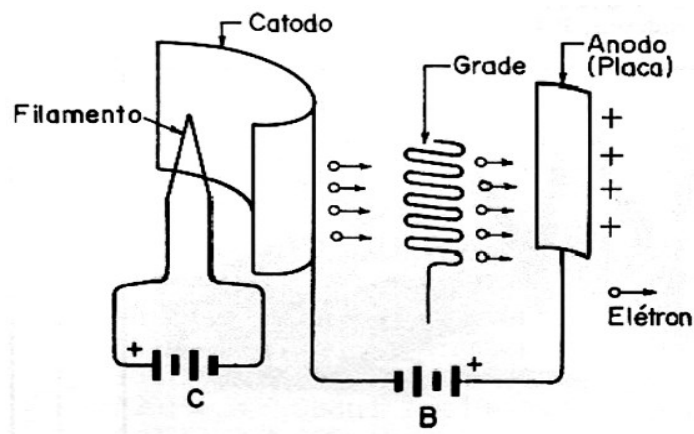


Figura 2 - Estrutura Simplificada da Válvula Tríodo

Fonte: Braga, (2020)

A fonte c aquece o filamento e o catodo, são emitidos elétrons que serão atraídos pela placa anodo que através da fonte B será polarizado positivamente.

A grade de controle normalmente consiste de um fio helicoidal que é colocado entre catodo e anodo ela serve como blindagem eletrostática controlando o fluxo de elétrons do catodo para o anodo. Se a grade estiver negativa, ela vai repelir os elétrons vindos do catodo e a corrente no anodo será nula ou mínima. Se a grade estiver positiva todos os elétrons emitidos pelo catodo são acelerados em direção a placa do anodo, não encontrando neste percurso, nenhum elemento que limite o fluxo de elétrons.

No caso apresentado, é a tensão de grade que faz o controle de corrente de placa já que a corrente na grade é mínima ou nula. A figura 3 mostra esse funcionamento.

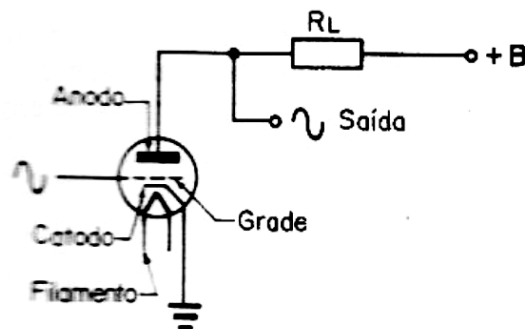


Figura 3 - Circuito Válvula do Triodo

Fonte: Braga, (2020)

O transistor FET tem sua funcionalidade parecida com a da válvula triodo. A figura 4 mostra essa semelhança.

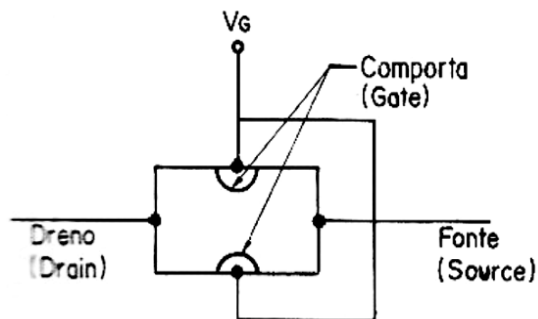


Figura 4 - Estrutura simples do transistor FET

Fonte: Braga, (2020)

O transistor FET constitui um canal semicondutor com eletrodos em cada extremidade denominado dreno e fonte. A porta que é o eletrodo de controle, fica situado próximo do canal, e quando é aplicada uma carga elétrica nessa porta ela é capaz de criar um efeito de campo

elétrico, e esse efeito de campo elétrico é que afeta o canal. E desta forma o FET controla o fluxo de portadores elétrons ou buracos que vão fluir da fonte para o dreno, esse controle é feito no tamanho e na forma do canal condutor.

O FET é controlado por tensão: uma tensão é aplicada na porta e a corrente flui entre dreno e fonte, diferente do BJT que precisa de uma corrente aplicada na base para se obter corrente no coletor.

Na configuração fonte comum apresenta uma alta impedância de dezenas de megohms. Diferente dos transistores bipolares. A tensão de entrada é aplicada ao Gate e a saída é medida no Dreno. A figura 5 mostra essa configuração.

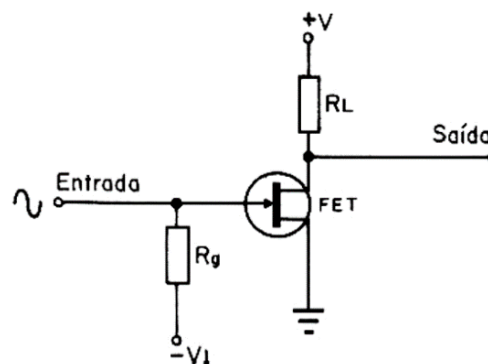


Figura 5 - FET com configuração fonte comum

Fonte: Braga, (2020)

Significado dos terminais do transistor FET

S – (source) fonte é o terminal de entrada dos portadores majoritários;

G – (gate) porta liga e desliga a corrente que circula entre Dreno e Fonte

VDD – é a tensão aplicada entre dreno e a fonte;

VGG – é a tensão aplicada entre gate (porta) e a fonte;

VGS – é a tensão medida entre gate (porta) e a fonte;

Comparando com o transistor bipolar:

D – (drain) = coletor

S – (source) = emissor

G – (gate) = base

BRAGA, (2020)

## 2.6 O transistor MOSFET canal N

Um MOSFET “Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”, ou transistor de efeito de campo com óxido de semicondutor e metal é fabricado sobre um substrato do tipo p, que é uma pastilha (bolacha) que é feita de um cristal único de silício que também serve de suporte físico para o transistor ou para o circuito inteiro, no caso de um circuito integrado. A dopagem é quando alguns outros elementos são adicionados ao semicondutor puro (o silício é bastante comum) com o objetivo de modificar a sua propriedade semicondutora. Da dopagem obtemos os elementos tipo p e tipo n. As duas regiões p e n são difundidas no substrato. Uma camada fina de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) de espessura  $t_{ox}$  (tipicamente 2-50 nm) que é um excelente isolante, é crescido sobre a superfície do substrato criando uma camada isolante que vai da região fonte até o dreno. Um metal é colocado por cima da camada de óxido de silício para formar o eletrodo de porta do dispositivo. São feitos contatos metálicos para as regiões da fonte, do dreno e do substrato que também é chamado de corpo. O dispositivo tem quatro terminais; o terminal da porta (gate – G), o terminal da fonte (source – S), o terminal do dreno (drain – D) e o terminal do substrato ou corpo (body). A figura 6 mostra a estrutura do MOSFET.

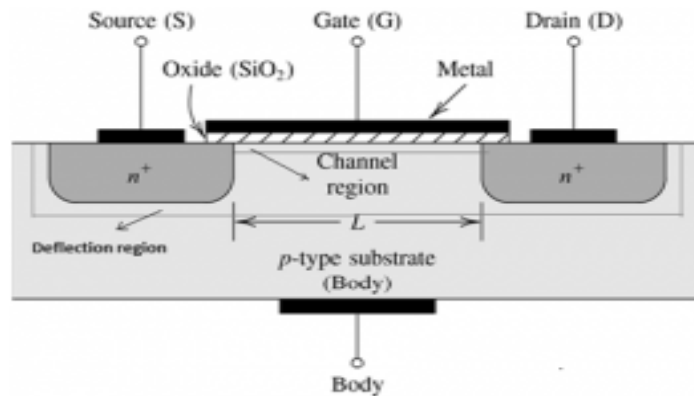


Figura 6 - Estrutura do NMOS seção transversal

Fonte: Sedra e Smith, (2013)

## 2.7 Princípios operacionais do MOSFET canal N

Se aplicar uma diferença de potencial entre a fonte e o dreno, não haverá circulação de corrente no Mosfet. Por que há junções p-n e uma delas estará na polarização reversa bloqueando a corrente. Um diodo é formado pela junção p-n entre a região  $n^+$  do dreno e o substrato tipo p, e o outro diodo é constituído pela junção p-n entre o substrato tipo p e a região  $n^+$  da fonte. Esses diodos na configuração que estão impedem a circulação de corrente do dreno para a fonte. Lembrando que o fluxo de elétrons é no sentido contrário da fonte para o dreno.

O funcionamento – depleção

Pequeno potencial aplicado ( $V_{GS} < V_t$ )

O potencial  $V_{GS}$  aplicado entre porta e substrato atrai elétrons livres e afasta lacunas livres da interface óxido substrato: surge uma região de depleção entre a interface e o substrato ligando as regiões de depleção das junções. A figura 7 mostra esse funcionamento.

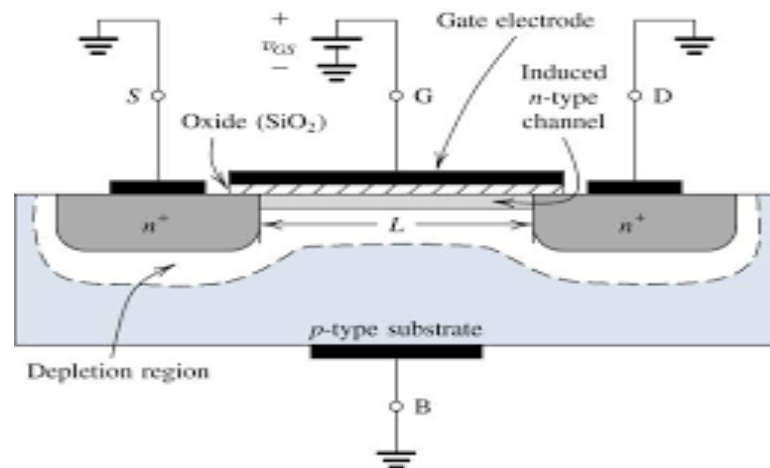


Figura 7 - NMOS tipo enriquecimento com tensão positiva aplicada à porta um canal é induzido no substrato abaixo da porta

Fonte: Sedra e Smith, (2013)

Quando  $V_{GS}$  for menor que  $V_t$  o dispositivo se comporta como uma chave aberta.

## 2.8 MOSFET funcionando na condição de inversão

Aumento do potencial aplicado ( $V_{GS} > V_t$ ): condições de inversão

Se o potencial  $V_{GS}$  aumentar, a concentração de elétrons livres aumenta na interface do óxido de silício (isolante). Quando a concentração de elétrons livres for maior que a de lacunas fixas (dopantes) ocorre a condição de inversão, isto é, na inversão surge um canal do tipo n induzido entre dreno e fonte.

O valor de  $V_{GS}$  em que ocorre a inversão é chamado de potencial de threshold ( $V_t$ ). A figura 8 mostra a formação do canal do tipo n.

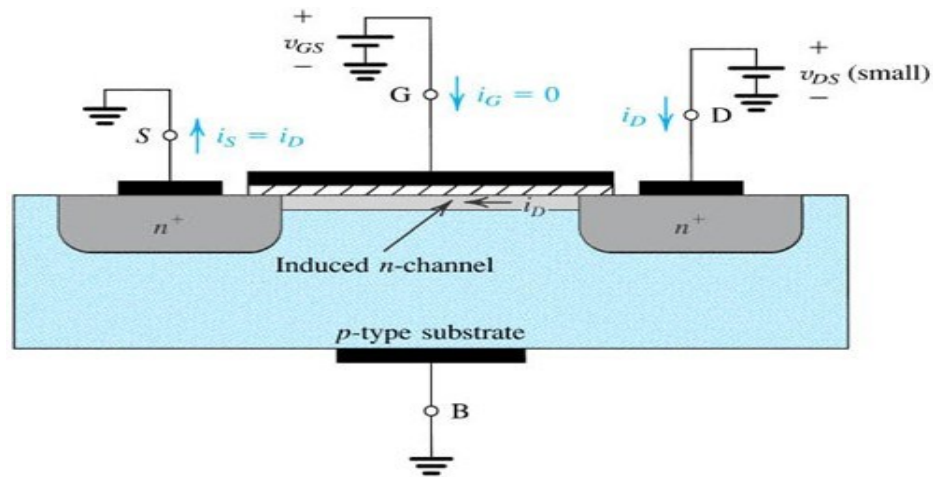


Figura 8 - NMOS com  $V_{GS} > V_t$  e pequeno valor de  $V_{DS}$  aplicado. O dispositivo age como uma condutância controlada por  $V_{GS}$ . A condutância do canal é proporcional a  $V_{GS} - V_t$ .  $I_D$  é proporcional a  $(V_{GS} - V_t) V_{DS}$ .

Fonte: Sedra e Smith, (2013)

Quando é aplicada uma tensão maior que  $V_t$  na porta, os elétrons são atraídos para a borda do isolante ( $\text{SiO}_2$ ) formando o canal de condução, esse canal é constituído por elétrons que foram atraídos pela carga positiva aplicada na porta (Gate). Esses elétrons que são atraídos pela porta são provenientes das regiões  $n^+$  da fonte e do dreno onde estão em bastantes quantidades.

## 2.9 NMOS funcionando na região ôhmica

A região ôhmica do MOSFET canal n é a região de operação onde o dispositivo opera como um resistor. Nesta região, a corrente de porta é proporcional a tensão de porta, e a corrente de dreno é proporcional a tensão de dreno. A resistência entre o dreno e a fonte é chamada resistência do canal. Essa resistência é controlada pela tensão de porta. Quanto maior a tensão de porta, maior a resistência do canal. A figura 9 mostra essa condição.



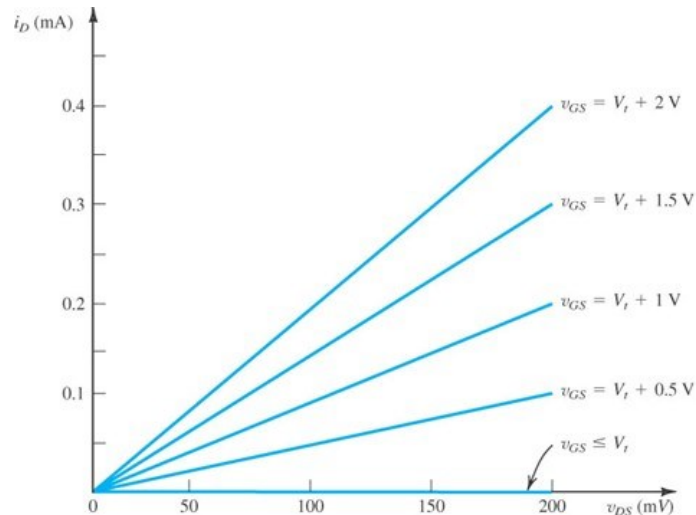


Figura 9 - Característica ID - VDS no MOSFET

Fonte: Sedra e Smith, (2013)

O gráfico apresenta o MOSFET se comportando como uma resistência linear, essa resistência é controlada pela tensão aplicada na porta (Gate). Se a tensão aplicada na porta tem valor menor que  $V_t$  então haverá uma resistência muito alta no canal impedindo seu funcionamento. Se for aumentando a tensão na porta gradualmente, muitos elétrons irão para o canal e a resistência irá diminuir também gradativamente. Essa quantidade grande de elétrons que flui para o canal torna o canal rico em elétrons, daí surgiu o nome MOSFET tipo enriquecimento. (SEDRA, SMITH, 2013).

### 2.10 NMOS operando com aumento de $V_{DS}$

Quando  $V_{GS} > V_t$  e  $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ . O transistor fica ligado, é um canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Como a tensão de dreno é maior que a tensão na porta uma parte do canal é desligado permitindo que portadores de carga preencha o canal de condução permitindo que a corrente flua livremente entre dreno e fonte, nessa condição o Mosfet está saturado ou em pinch-off. Na condição de saturação o Mosfet é usado em circuitos de potência para controlar a corrente de saída. A figura 10 mostra essa condição.

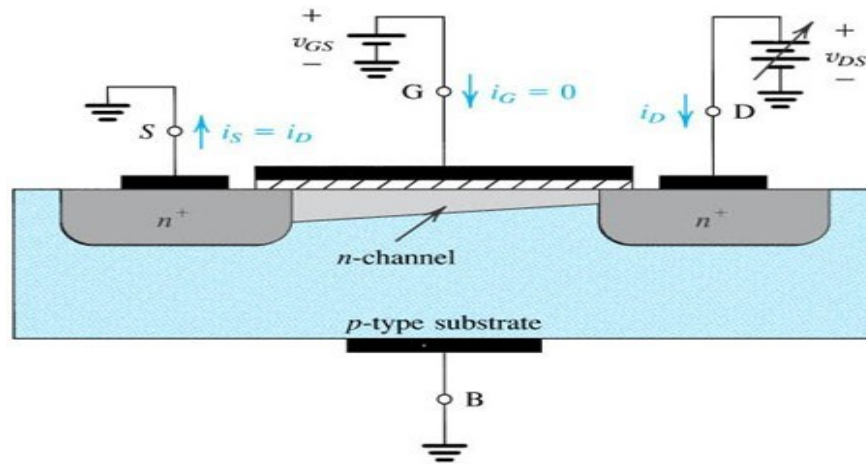


Figura 10 - MOSFET canal N com canal em pinch – off ou saturação

Fonte: Sedra e Smith, (2013)

O efeito do aumento de  $V_{DS}$  é que o canal vai se estrangulando perto de dreno. Com  $V_{DS}$  acima de  $V_{GS} - V_t$  o aumento da tensão de dreno praticamente não causa mais efeito.

De acordo com a figura 10, observamos que  $V_{DS}$  aparece com uma queda de tensão na extremidade do canal. À medida que caminhamos no canal da fonte para o dreno, a tensão aumenta de 0 até  $V_{DS}$ . Então a tensão não se mantém com um valor constante ao longo do canal. A tensão entre a porta e os pontos ao longo do canal são diferentes, vai diminuindo de  $V_{GS}$  na fonte até  $V_{GS} - V_{DS}$  no dreno. Percebemos que o canal não é uniforme em toda sua estrutura já que depende da tensão para o seu aprofundamento. Com isso o canal tomará a forma de um estreitamento em sua extremidade, sendo mais profundo no final da fonte e sendo mais superficial no final do dreno. À medida que  $V_{DS}$  aumenta o canal vai estreitando e a sua resistência vai aumentando. E quando aumentamos  $V_{DS}$  até o valor que reduz a tensão entre o canal no final do dreno para  $V_t$ , a profundidade do canal diminui até próximo de zero dizemos que canal está estrangulado (pinched-off). Aumentando  $V_{DS}$  além desse valor a corrente se mantém constante a partir de  $V_{DS} = V_{GS} - V_t$ . A corrente de dreno satura e MOSFET começa a operar na região de saturação. (SEDRÁ, SMITH. 2013).

## 2.11 Regiões de operação no MOSFET

São as regiões de operação do Mosfet canal N, a figura 11 detalha esse funcionamento.

Corrente de dreno  $i_D$  versus a tensão dreno-fonte  $v_{DS}$ , para  $v_{GS} > V_t$

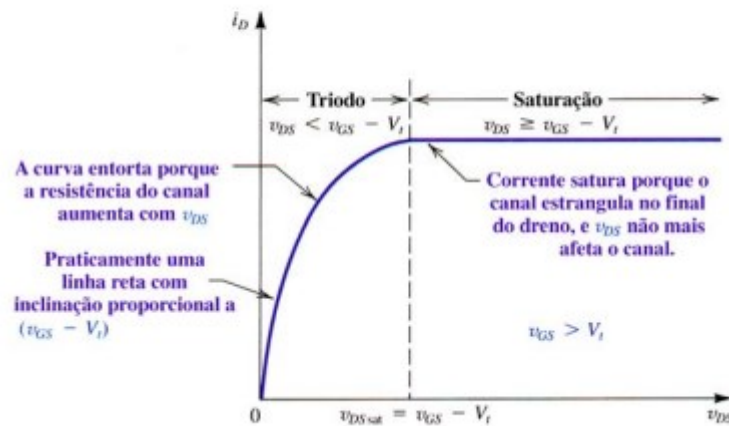


Figura 11 - Corrente de dreno  $i_D$  versus a tensão dreno fonte, para  $V_{GS} > V_t$ .

Fonte: Martino, (2017)

Região de corte: quando  $V_{GS} \leq V_t$ , onde  $V_{GS}$  é a tensão entre porta e a fonte. O transistor permanece desligado, e não há condução entre o dreno e a fonte. A corrente entre dreno e fonte deve ser idealmente zero, há uma fraca corrente invertida.

Região de tríodo (ou região linear): quando  $V_{GS} > V_t$  e  $V_{DS} < V_{GS} - V_t$ , onde  $V_{DS}$  é a tensão entre dreno e fonte. O transistor é ligado, e o canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. O MOSFET opera como um resistor, controlado pela tensão na porta.

Região de saturação: quando  $V_{GS} > V_t$  e  $V_{DS} > V_{GS} - V_t$  o transistor fica ligado e um canal que é criado permite o fluxo de corrente entre dreno e fonte. Como a tensão de dreno é maior que a tensão da porta, uma parte do canal é desligado. A criação dessa região é chamada de "pinch-off". A corrente de dreno. A corrente de dreno fica independente da tensão de dreno (numa primeira aproximação) e é controlada somente pela tensão da porta. (SEDRA, SMITH. 2013)

## 2.12 Equações, símbolos e parâmetros do MOSFET canal N

- Região de corte ( $v_{GS} \leq V_t$ ):

$$i_D = 0$$

- Região triodo ( $v_{GS} > V_t$  e  $v_{DS} < v_{GS} - V_t$ ):

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left( (v_{GS} - V_t)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right) (1 + \lambda v_{DS})$$

- Região de saturação ( $v_{GS} > V_t$  e  $v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$ ):

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

Equação 1 – Parâmetros do MOSFET Canal N

Fonte: Sedra e Smith, (2013)

Símbolos do MOSFET tipo enriquecimento;

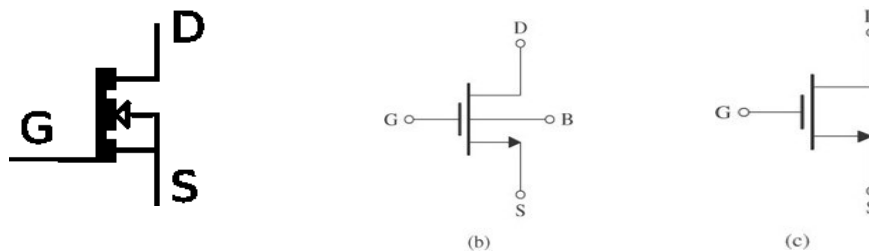


Figura 12 - MOSFET tipo enriquecido

Fonte: Sedra e Smith, (2013)

Parâmetros:

|                              |                 |   |
|------------------------------|-----------------|---|
| Mobilidade de elétrons       | $\mu_n$         | $\approx 580 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  |
| Mobilidade de lacunas        | $\mu_p$         | $\approx 210 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  |
| Espessura do óxido           | $t_{ox}$        | de 0,02 a 0,1 $\mu\text{m}$   |
| Permissividade do óxido      | $\epsilon_{ox}$ | $= 3,97\epsilon_0$<br>$= 3,97 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} = 3,51 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}$   |
| Capacitância do óxido        | $C_{ox}$        | $= \epsilon_{ox}/t_{ox}$<br>$= 1,75 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ para $t_{ox} = 0,02 \mu\text{m}$<br>$= 0,351 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ para $t_{ox} = 0,10 \mu\text{m}$                             |
| Transcondutância do processo | $k'_n$          | $= \mu_n C_{ox} = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$<br>de $20 \mu\text{A}/\text{V}^2$ , para $t_{ox} = 0,10 \mu\text{m}$<br>a $100 \mu\text{A}/\text{V}^2$ , para $t_{ox} = 0,02 \mu\text{m}$   |
|                              | $k'_p$          | $= \mu_p C_{ox} = \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$<br>de $7,1 \mu\text{A}/\text{V}^2$ , para $t_{ox} = 0,10 \mu\text{m}$<br>a $35,5 \mu\text{A}/\text{V}^2$ , para $t_{ox} = 0,02 \mu\text{m}$ |

Equação 2 - Parâmetros

Fonte: Sedra e Smith, (2013)

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Local de Estudo

Esse trabalho foi realizado no laboratório do IFAM – CMDI, o transistor Mosfet escolhido foi o 2n7000.

### 3.2 Análises

O objetivo é verificar os parâmetros de funcionamento do referido transistor, como: tensão de limiar que é a tensão mínima aplicada na porta para que o transistor comece a conduzir. Fazer a medição da corrente de dreno e suas variações para identificar o momento de saturação do transistor. Utilizar simulador MultiSim para levantar curvas do MOSFET e comparar com o datasheet do componente.

#### **Material necessário:**

- Transistor MOSFET canal N
- Resistor de 1k ou de 2,2k $\Omega$
- Potenciômetro

#### **Equipamentos:**

Protoboard (do próprio estudante)

Multímetro (do próprio estudante) e do laboratório.

Computador do laboratório

#### **Materiais complementares:**

Fios para protoboard

Cabos com pino banana/garra jacaré



Figura 13 - Placa do laboratório Indústria III. IFAM – CMDI

Fonte: Próprio Autor, (2022)

### 3.3 Instrumentos utilizados na coleta de dados

#### 3.3.1 Fonte de Alimentação Keithley 2231-30-3

O Keithley 2231A-30-3 é uma fonte de alimentação programável de alta precisão que oferece uma saída de 30V e 3. Possui um display LCD de 4 dígitos e um teclado de membrana para ajustar os parâmetros de saída. Também possui um recurso de proteção contra sobrecarga e curto-circuito para garantir a segurança do equipamento. Além disso possui, possui um modo de operação remoto para permitir o controle remoto da fonte de alimentação. A figura 14 mostra a fonte Keithley.



Figura 14 - Fonte Keithley 2231A-30-3

Fonte: Cistek, (2022)

Características técnicas:

- Duas saídas variáveis de 0 – 30V e 0 – 3A;
- Uma saída variável de 0 – 5V e 0 – 3A;
- Três saídas eletricamente isoladas;
- Display com tensão e corrente dos três canais simultaneamente;
- Regulação linear com baixo ruído;
- Modo serie e paralelo para aumentar tensão ou corrente;
- 30 configurações;
- Modo rastreado, permite que as saídas mantenham razão entre si.

### 3.3.2 Multímetro digital Keysight 34460A

O multímetro Keysight 34460A é um multímetro digital de alta precisão que oferece medições de tensão, corrente, resistência, capacitância e frequência. Ele possui uma tela LCD de alta resolução que permite a visualização em tempo real. Além disso, o multímetro possui um modo de medição de alta velocidade, que permite ao usuário realizar medições mais rápidas. A figura 15 mostra o multímetro digital Keysight 34460A.



Figura 15 - Multímetro Keysight 34460A

Fonte: Keysight, (2022)

Características Técnicas:

- Dígitos de resolução 6 <sup>1</sup>/<sub>2</sub>;
- Precisão básica 75 ppm;
- Taxa de leitura máxima 300 leituras;
- Memória 1000 leituras;
- Interface USB;
- Voltagem máxima de entrada: 1000 V, corrente máxima de entrada 3A

- Medições básicas: DCV, ACV, DCI, ACI, resistência de 2 e 4 fios, frequência, período, continuidade, diodo, temperatura e capacitância.

### 3.4 Componente Transistor 2N7000 - MOSFET de Canal N TO-92

O 2N7000 é um transistor MOSFET de canal N, fabricados com a tecnologia DMOS, foram projetados para minimizar a resistência no estado ao mesmo tempo em que fornecem desempenho de comutação robusto, confiável e rápido. Podem ser usados nas aplicações que exigem até 400mA CC e podem fornecer correntes pulsadas de até 2A.

Esses transistores são particularmente adequados para aplicações de baixa tensão e baixa corrente, relés, controladores de linha de transformadores, controle de servo motor pequeno, Drives de potência e muitas outras aplicações de comutação. A figura 16 representa o MOSFET com o encapsulamento TO-92 que é empregado em transistores de baixa potência.



Figura 16 - Transistor MOSFET com encapsulamento TO-92

Fonte: Saraviti, (2022)

Especificações Técnicas:

- Modelo: 2N7000
- Encapsulamento: TO-92 3 pinos
- Tensão de dreno para a fonte: VDSS 60V
- Tensão da porta de Drenagem: VDGR0V
- Corrente Máxima de Drenagem – Contínua: ID 200mA
- Corrente Máxima de Drenagem – Pulsada: 500mA
- Temperatura de operação: - 55 ~ 150 Graus Celsius
- Tensão Limiar do Gate: VGS (th) 2,1V
- Polaridade MOSFET: Canal N
- Dissipação de energia: 400 mW



- Modo de canal: Aprimoramento

### 3.5 Circuito com o transistor MOSFET 2N7000

A figura 17 mostra o esboço do circuito que vai ser montado no protoboard.

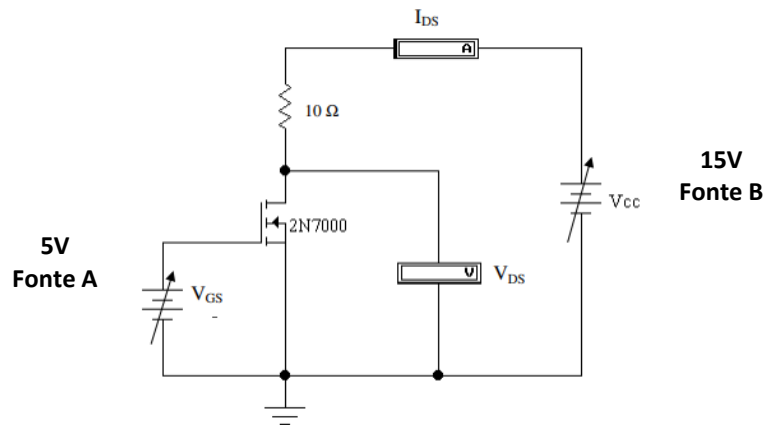


Figura 17 - Circuito com transistor MOSFET 2N7000

Fonte: PUC Engenharia, (2018)

A figura 18 mostra o circuito elétrico com transistor 2N7000 e o resistor de 2,2 K montado no protoboard. Foram utilizados os fios para as devidas ligações do transistor e do resistor para os bornes de alimentação do protoboard. Os cabos pino banana/garra jacaré foram utilizados nas conexões das fontes para o protoboard para alimentar o circuito com tensão de 5V na fonte A e 15V na fonte B.

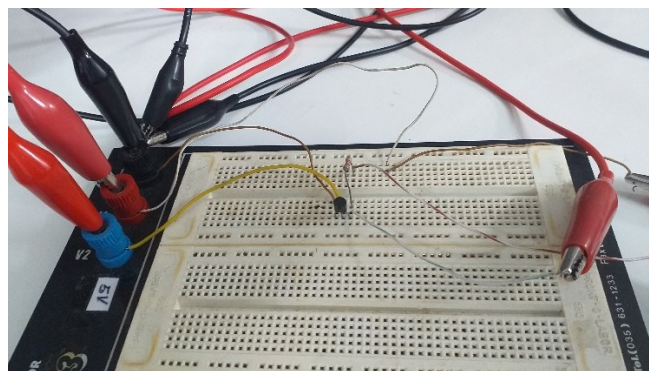


Figura 18 - Circuito montado no protoboard

Fonte: Próprio Autor, (2022)

## 4 RESULTADOS E COMENTARIOS

### 4.1 Resultado experinmento prático em laboratório

Depois de montado o circuito da figura 18, o multímetro Keysight foi utilizado como amperímetro ligado em série com resistor de dreno. Foram utilizadas duas fontes Keysight para alimentar o circuito e polarizar o transistor. O interesse é verificar os parâmetros DC do MOSFET. A fonte A foi ajustada lentamente e uma corrente de dreno se fez presente no multímetro, indicando que a tensão de VGS ficou acima da tensão de limiar,  $V_t$ , a tensão a ser descoberta. A tensão de VGS foi refinada e o valor encontrado foi de 2,10V.

$V_t = 2,10V$ . A tensão de limiar medida é semelhante a da especificação técnica do MOSFET. Encontrado o valor de  $V_t$ , a tensão de VGS foi variada de 50 em 50mV, monitorando a corrente de ID e a tensão de VDS. Para monitorar a tensão de VDS foi utilizado mais um multímetro. Anotar todos os valores na tabela 1 até que VDS fique menor que  $VGS - V_t$ , indicando que o transistor saiu da região de saturação.

Esses valores foram medidos em uma temperatura ambiente de 25°C.

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VGS | 2,10  | 2,15  | 2,20  | 2,25  | 2,30  | 2,35  | 2,40  | 2,45  | 2,50  | 2,55  | 2,60  |
| VDS | 14,58 | 14,30 | 13,85 | 13,18 | 12,30 | 10,95 | 09,15 | 06,82 | 04,07 | 01,28 | 00,25 |
| ID  | 0,181 | 0,350 | 0,498 | 0,794 | 1,237 | 1,834 | 2,666 | 3,728 | 5,007 | 6,301 | 6,775 |

Tabela 1 - Valores medidos de VGS, VDS, ID

Fonte: Word, ( 2022)

O segundo resultado da medição: identificar o valor de VDS quando  $VGS - V_t$ .

$$VDS > VGS - V_t = 01,28V.$$

Regiões de operação do MOSFET;

**Região de corte:** Quando  $VGS < V_t$ , onde VGS é a tensão entre a porta (gate) e a fonte (source) e não há condução entre o dreno e a fonte.

**Região de Trípodo** ou região linear: quando  $VGS > V_t$  e  $VDS < VGS - V_t$  onde VDS é a tensão entre dreno e fonte. O transistor é ligado, e o canal que é criado permite o fluxo de corrente

entre o dreno e a fonte. O MOSFET opera como um resistor, controlado pela tensão na porta. A corrente de dreno para a fonte

$$I_D = K[2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2], \text{ onde } K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

**Região de saturação:** quando  $V_{GS} > V_t$  e  $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ . O transistor fica ligado, e um canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Como a tensão de dreno é maior do que a tensão na porta, uma parte do canal é desligado, a criação dessa região é chamada de “pinch off”. A corrente de dreno é agora relativamente independente da tensão de dreno, e é controlada somente pela tensão da porta de tal forma que:

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

Onde  $V_t$  – tensão de limiar

$(W/L)$ : razão de aspecto (largura pelo comprimento do canal)

$k_n'$ : parâmetro de transcondutância do processo (dado  $\mu A/V^2$  ou  $mA/V^2$ ).

As medições elétricas no transistor MOSFET canal N, deram resultados satisfatórios. Os parâmetros coletados foram suficientes para estabelecer uma comparação com as regiões de trabalho do referido transistor.

#### 4.2 Resultado do Circuito Simulado no MultiSim

Os valores coletados de tensão e corrente e que estão na tabela 1, vão servir de parâmetros para levantar as curvas do MOSFET no simulador MultiSim. A figura 19 mostra como ficou o circuito no simulador.

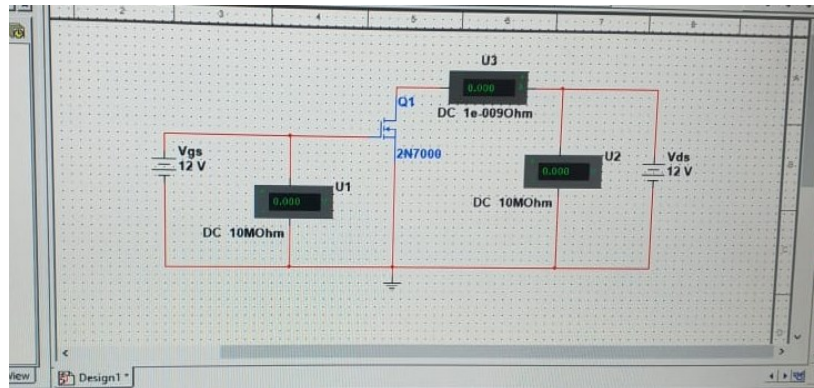


Figura 19 - Circuito com MOSFET 2N7000

Fonte: Multisim, (2022)

A figura 20 mostra a curva  $I_D - V_{GS}$  onde é possível identificar o ponto de 2,10V em  $V_{GS}$ . Esse valor no MOSFET é chamado de tensão de limiar (threshold) ou  $V_t$ .

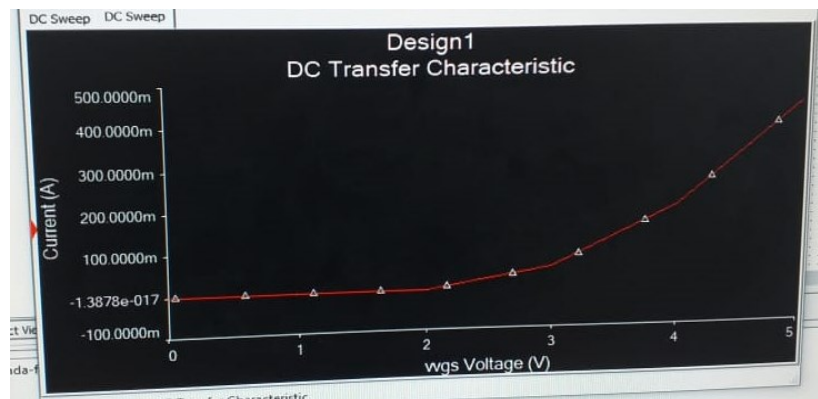


Figura 20 - Curva característica  $I_D - V_{GS}$ . tensão de limiar

Fonte: Multisim, (2022)

Os valores retirados da tabela 1 agora vão aparecer nessa próxima simulação no MultiSim onde mostrará o MOSFET com várias curvas. Cada curva representa uma tensão aplicada em  $V_{GS}$ . A figura 21 mostra essas curvas.

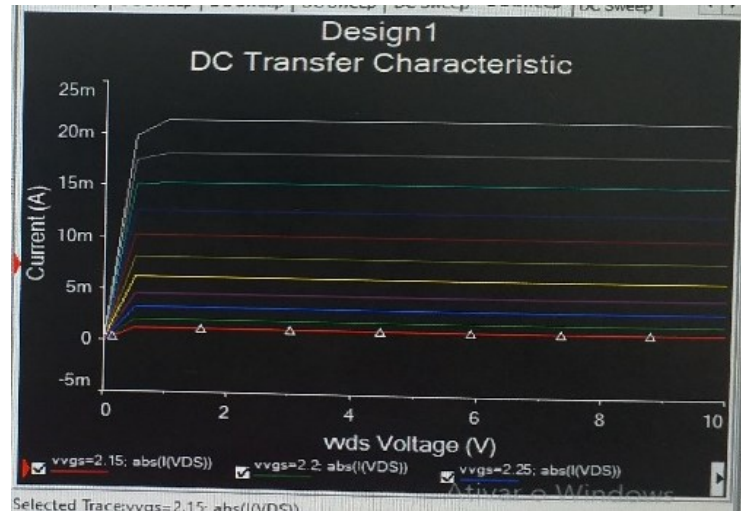


Figura 21 - Curvas características do Funcionamento do MOSFET canal N

Fonte: Multisim, (2022)

O datasheet do transistor MOSFET 2N7000 serviu de base para fazer o levantamento das curvas e fazer as devidas comparações. A figura 22 foi retirada do datasheet do próprio componente. As curvas simuladas no MultiSim são bem parecidas com as do datasheet.

### 4.3 Datasheet fornecido pelo fabricante

O Datasheet foi criado com o propósito de reunir dados e especificações de um determinado produto em um único documento. Essas informações são importantes, pois contém as características de desempenho e funcionamento do componente. As informações contidas no documento servem para que um projeto seja executado com mais qualidade. Um componente tem grandezas específicas, valores médios, faixas de trabalho, temperaturas, tolerâncias ou valor nominal do componente. Geralmente é fornecido pelo fabricante para ajudar, quem tem interesse, na escolha do produto. A figura 23 mostra a capa do datasheet do MOSFET 2N7000.

Figure 6. Output characteristics

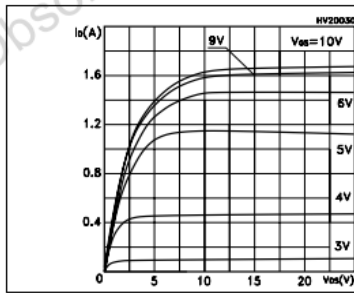


Figure 7. Transfer characteristics

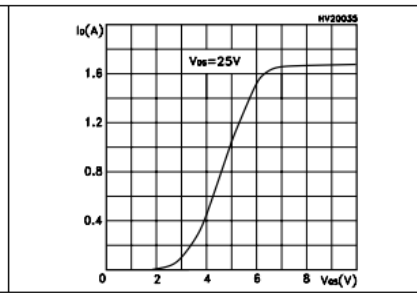



Figura 22 - Curvas do transistor MOSFET no Datasheet

Fonte: St.com, (2022)



**2N7000**  
**2N7002**

---

N-channel 60 V, 1.8 Ω, 0.35 A, SOT23-3L, TO-92  
STripFET™ Power MOSFET

---

**Features**

| Type   | V <sub>DSS</sub> | R <sub>DS(on)</sub> max | I <sub>D</sub> |
|--------|------------------|-------------------------|----------------|
| 2N7000 | 60 V             | < 5 Ω (@10V)            | 0.35 A         |
| 2N7002 | 60 V             | < 5 Ω (@10V)            | 0.20 A         |

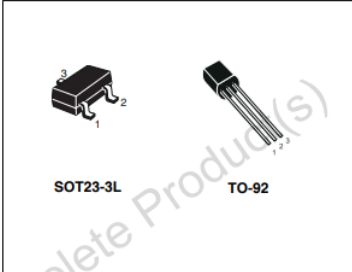
- Low Q<sub>g</sub>
- Low threshold drive

**Application**

- Switching applications

**Description**

This Power MOSFET is the second generation of STMicroelectronics unique "single feature size" strip-based process. The resulting transistor shows extremely high packing density for low on-resistance, rugged avalanche characteristics and less critical alignment steps therefore a remarkable manufacturing reproducibility.



SOT23-3L      TO-92

**Figure 1. Internal schematic diagram**

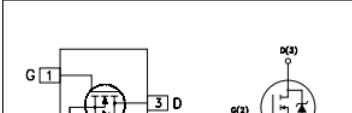


Figura 23 – Datasheet do MOSFET 2N700

Fonte: St.com, (2022)

## 5 CONCLUSÃO

Caracterização elétrica do transistor Mosfet, esse foi meu tema escolhido para realizar esse trabalho de pesquisa. É um assunto que é muito importante na atualidade. Os componentes eletrônicos vão evoluindo a cada dia que passa, ficam cada vez menores, e precisam de certo conhecimento para fazer o uso correto deles.

Foi um trabalho feito com muito cuidado e paciência, e por mais que nos esforçamos para entregar um trabalho bem feito, sempre tem algum item que não ficou como esperado. Felizmente esse trabalho foi realizado. Tive muito apoio da instituição, que em nenhum momento, seja através da coordenadora dos funcionários, do meu orientador, me negaram uma orientação técnica para concluir essa pesquisa.

Caracterizar um componente é muito importante, traz conhecimento para quem está realizando a pesquisa. Saber como funciona como foi projetado, quais são os elementos que foram utilizados para a fabricação de tal componente é muito importante. E o conhecimento é de suma importância para poder ajudar outras pessoas.

De todo esforço que foi posto nesse projeto de pesquisa, o resultado foi que, escolher um transistor para a pesquisa, fazer todo o processo de medição, pesquisar em livros, sites, ficar horas sem dormir valeu muito a pena. Consegui chegar com resultado satisfatório, pois no final as medidas feitas no transistor e levantadas a curvas características bateram com datasheet do componente estudado.

Pode ser que eu mesmo continue me aprofundando nesse assunto mais em frente, pois é muito interessante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS e Teoria de Circuitos. 11ª ed. São Paulo: Pearson, 2013.

Cistek.com.br

Keithley 2231A-30-3 Fonte de Alimentação Tripla. Cistek. 2022

Disponível em: <<https://www.cistek.com.br/fontes-e-cargas/Keithley-2231-30-3-fonte-de-alimentação-tripla-de-bancada-30v-3a>> Acesso em: 28 de fev. 2023,10:30.

Ieee.org Impacto dos transistores no mundo contemporâneo. 2022. Disponível em: <<https://edu.ieee.org/br/ufcgras/impactos-dos-transistores-no-mundo-contemporaneo/>>. Acesso em: 17 de fev. de 2023, 22:41.

MALVINO, Albert, BATES, David J. **Eletrônica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MULTISIM. Software de aplicação para instrumentação e teste eletrônico. NI National Instruments. 2022. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/shop/software/products/multi.html>> Acesso em: 17 de fev. 2023.

Newtonbraga.com.br

Conheça o FET (ART4453) – Instituto Newton C. Braga

Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/19651-conheça-o-fet-art4453.html>> 2022. Acesso em: 20 de fev. de 2023, 15:00.

PUCENGENHARIA-PUC-SP

2ª Experiência. “Curva característica do MOSFET”.

Disponível em: <[http://www.pucsp.br/~elo2eng/Exp2\\_DCE\\_2018.pdf](http://www.pucsp.br/~elo2eng/Exp2_DCE_2018.pdf)> Acesso em: 27 de fev.2023, 15:00.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth, C. Microelectronic Circuits. 6. ed. Oxford: Oxford University Press Inc., 2013.



st.com

2n7000 2n7002 STMicroelectronics

Disponível em: <<https://www.st.com/resource/em/datasheet/cd00005134.pdf>> Acesso em: 22 de fev. de 2023, 01:51.

saravati.com.br

Transistor 2N7000 – MOSFET de canal N TO-92 – Saravati

Disponível em: <<https://www.saravati.com.br/transistor-2n7000&cd=2&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=br>> Acesso em: 27 de fev. de 2023, 14:22.

34460A Digital Multimeter, 6 <sup>1</sup>/<sub>2</sub> Digit, Basic Truevolt. Keysight. 2022. Disponível em: <<https://www.keysight.com/br/ptproduct/34460A/digital-multimeter-6-5-digit-basic-truevolt.html>>